

近 30 年来洞庭湖水质营养状况演变特征分析*

熊 剑¹, 喻方琴¹, 田 琪², 黄代中², 李利强^{2**}

(1: 岳阳市环境监测中心, 岳阳 414000)

(2: 湖南省洞庭湖生态环境监测中心, 岳阳 414000)

摘 要: 根据 1986—2015 年 30 年的水质监测数据, 利用湖泊水质单因子评价和综合营养状态指数 (*TLI*) 对洞庭湖水质营养状况变化趋势进行评价分析. 1986—2015 年全湖 I ~ III 类水质百分比呈现极显著下降趋势, 近 5 年来稳定在 IV 类水平, 影响水质的污染物为总氮 (TN) 和总磷 (TP), 全湖 TN 浓度、TP 浓度和 *TLI* 在过去 30 年里呈显著或极显著上升趋势, TN 和 TP 等是洞庭湖水质类别的主要影响因子. 在空间分布上, *TLI*、TN 浓度、TP 浓度和 Chl.a 浓度高低顺序均表现为东洞庭湖>南洞庭湖>西洞庭湖, 且东洞庭湖 TN 浓度和 Chl.a 浓度与其它湖区差异显著. 1986—2002 年洞庭湖水质营养状态呈现波动上升趋势, 主要与面源污染有关; 2003—2007 年富营养化趋势有所减缓, 可能与期间工业污染下降和水环境容量扩大有关; 但 2008—2015 年又开始明显加剧, 可能是流域内工业与农业污染增加、内源污染释放与水环境容量减小造成的. 30 年来洞庭湖各湖区基本均处于中营养状态, 但接近轻度富营养且 2008—2010 年和 2015 年东洞庭湖等部分湖区达到轻度富营养水平. 洞庭湖近年来蓝藻门所占比例明显上升, 部分湖区已经暴发蓝藻水华.

关键词: 洞庭湖; 水体富营养化; 水华; 总氮; 总磷; 综合营养状态指数

The evolution of water quality and nutrient condition in Lake Dongting in recent 30 years

XIONG Jian¹, YU Fangqin¹, TIAN Qi², HUANG Daizhong² & LI Liqiang^{2**}

(1: Yueyang Environment Monitoring Centre, Yueyang 414000, P.R.China)

(2: Lake Dongting Eco-Environment Monitoring Centre, Yueyang 414000, P.R.China)

Abstract: Based on the 30 years' monitoring data in Lake Dongting from 1986 to 2015, we evaluated the changing pattern of water quality and nutrient condition using single factor's evaluation and water trophic level index (*TLI*). The water quality of Lake Dongting remained at IV level in the last five years and the percentages of I - III level declined significantly from 1986 to 2005. Total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were the major influential factors on the water quality. Over the long-term period, the concentration of TN, TP and *TLI* increased significantly from 1986 to 2015. It showed that TN and TP were major factors which affected the water quality and *TLI* in Lake Dongting. The ranking order of TN, TP and Chl.a in different part of Lake Dongting was East>South>West. TN and Chl.a of the East part were the significantly highest. The water quality was significantly influenced by the flood during 1986 - 2002, while it tended to improve during 2003 - 2007, because of the decrease of industry pollution and water capacity expansion. However, it tended to eutrophic again during 2008 - 2015 which might be caused by the increase of the pollution from local industry and agriculture, endogenous pollution release and water capacity decrease. In the last 30 years, the whole lake was at the mesotrophic level, but suffered to light eutrophication especially in the eastern lake, which arrived at light eutrophication during 2008 - 2010 and 2015. The abundance of blue algae in Lake Dongting increased quickly in last 5 years, while some part of the lake had outbreak blue algae bloom.

Keywords: Lake Dongting; water eutrophication; algae bloom; total nitrogen; total phosphorus; water trophic level index

洞庭湖承纳湘、资、沅、澧“四水”, 吞吐长江, 属于长江中下游浅水型湖泊^[1]. 是我国第二大淡水湖, 不仅储存着宝贵的淡水资源, 还是多种鸟类、鱼类等水生动物的栖息地和许多水生植物的生长栖息地, 其中不乏

* 2015 年湖南环保科技计划项目 (2015015) 和全国重点湖泊水库生态安全保障方案项目 (WFLY-2009-01-PG05) 联合资助. 2016-05-31 收稿; 2016-08-18 收修改稿. 熊剑 (1986-), 男, 工程师; E-mail: xjtwj2005@163.com.

** 通信作者; E-mail: lilqiang858@163.com.

东方白鹤、黑鹳、鲟鱼和中华鲟等国家级珍稀保护物种. 洞庭湖不仅有十分丰富的生物多样性资源, 还具有调节长江洪水径流作用. 全国五大淡水湖泊中, 同在长江中下游的太湖、巢湖均已出现水体富营养化, 部分湖区甚至暴发蓝藻水华^[1]. 相关研究结果表明, 以总氮、总磷为主要污染物的水质富营养化已成为目前国内三大湖的共同特征^[2-4]. 洞庭湖虽未暴发蓝藻水华, 但水质现状也不容乐观, 湖泊整体呈中营养水平, 但水质呈现下降趋势, 水体富营养化逐渐加重^[5], 目前, 对洞庭湖的水质研究多集中于水位、泥沙淤积与环境容量和重金属污染等方面^[6-8], 虽然也有水质评价的研究, 但时间尺度较短^[9]. 对洞庭湖的长期水质营养状况作出全面评价与分析, 并结合分析浮游藻类的生长繁殖趋势, 为洞庭湖的水体生态环境保护提供理论基础, 具有十分重要的意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集与监测分析方法

洞庭湖监测断面共有 14 个 (图 1), 即 4 个入湖断面, 樟树港 (1)、万家嘴 (2)、坡头 (3) 和沙河口 (4); 9 个湖体断面主要包括西洞庭湖区的南嘴 (5)、目平湖 (6) 和小河嘴 (7) 断面, 南洞庭湖区万子湖 (8)、横岭湖 (9) 和虞公庙 (10) 断面, 东洞庭湖区鹿角 (11)、东洞庭湖 (12) 和岳阳楼 (13) 断面; 1 个出湖口断面为洞庭湖出口 (14) 断面. 每个断面设左、中、右 3 条垂线, 均采样表层水样, 频率为每月 1 次. 监测项目包括地表水环境质量标准 (GB 3838—2002) 中的 24 项基本指标和叶绿素 a 浓度 (Chl.a)、透明度 (SD). 本研究中参与综合营养状态指数 (TLI) 计算的总氮 (TN)、总磷 (TP)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn})、Chl.a、SD 的前处理、分析等均参照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[10] 进行. 采样时加硫酸至 pH ≤ 2, 采用酸性滴定法测定 COD_{Mn}; 采样时加硫酸至 pH ≤ 2, 用过硫酸盐消解钼锑抗分光光度法测定 TP 浓度; 采样时加硫酸至 pH ≤ 2, 采用碱性过硫酸盐消解紫外分光光度法测定 TN 浓度; Chl.a 浓度使用微孔滤膜抽滤丙酮提取分光光度法测定; 透明度采用塞氏盘法现场测定.

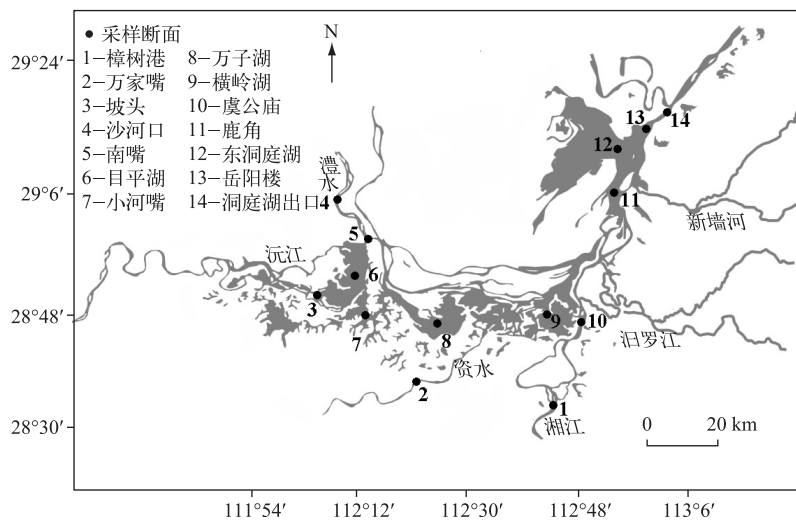


图 1 洞庭湖采样断面示意

Fig.1 The distribution of sampling sites in Lake Dongting

1.2 数据收集与处理

所有水质数据来源于湖南省洞庭湖生态环境监测中心. 各湖区水质指标的年际变化趋势分别以年度算术平均值进行分析处理. 根据地表水环境质量标准 (GB 3838—2002), 采用单因子评价法对水质进行评价, 年度水质类别比例则由各断面每月水质类别比例统计而来, 利用湖泊综合营养状态指数 TLI 对水体营养状况进行评价^[11]. 使用 Sigmaplot 12.0 和 SPSS 13.0 软件分别对数据作绘图和分析处理, 使用 One-way 单因素

方差分析进行差异性统计分析,选用 Spearman 秩相关系数进行 Daniel 趋势检验,使用 SPSS 13.0 软件进行 M-K 突变性检验, $P < 0.05$ 为显著水平, $P < 0.01$ 为极显著水平。

2 结果与分析

2.1 洞庭湖水质状况演变特征

1986 年以来,对全湖进行 GB3838—2002 中 24 项指标的每月 1 次常规监测,结果表明,洞庭湖水质由 1986—1990 年间的 II 类水质为主(占比 65%~72%)逐渐下降为 2011—2015 年的 IV 类(占比 51%~72%)为主(图 2),除 TN 和 TP 外,其余 22 项指标均达到 I~III 类标准,影响洞庭湖水质类别的主要污染物为 TN 和 TP。2013 年以来,14 个监测断面中,除 4 个人湖断面呈现 II 或 III 类水质外,其余断面均呈现 IV 类水质,个别断面甚至下降为 V 类水质。全湖 I~III 类水质变化趋势 Daniel 检验结果 r_s 值为 -0.873,绝对值远大于 0.01 显著水平临界值($N = 15$ 时, $w_p = 0.623$),这表明近三十年来洞庭湖 I~III 类水质百分比呈现极显著下降趋势。

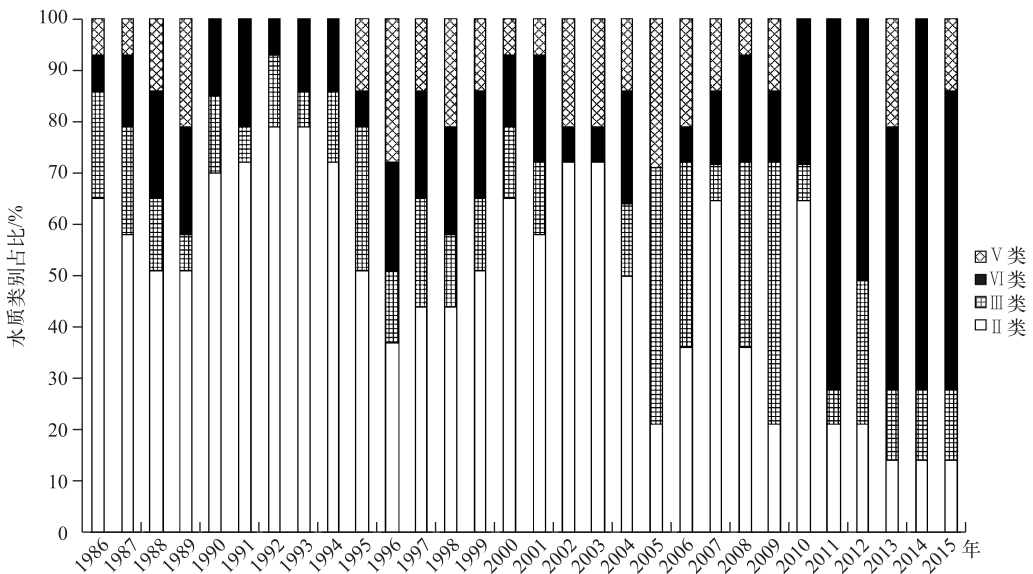


图 2 1986—2015 年洞庭湖水质类别演变特征

Fig.2 The evolution of water quality of Lake Dongting during 1986—2015

2.2 洞庭湖主要污染物演变特征

从 1986 年有 TN 浓度监测数据以来到 2015 年为止,洞庭湖 TN 浓度呈现波动上升的趋势,波动范围在 0.83~2.03 mg/L 之间(图 3a),长期变化趋势定量分析结果(表 1)表明,3 个湖区在过去 30 年里 TN 浓度均极显著上升($r_s > 0$, $P < 0.01$). 其中 1986 年 2002 年为波动上升,2003—2007 年略有所下降,而 2008 年以来明显上升。在空间分布上,洞庭湖 TN 浓度表现为东洞庭湖>南洞庭湖>西洞庭湖,且东洞庭湖与南洞庭湖在同一水平,但均与西洞庭湖差异性极显著($P < 0.01$)。

洞庭湖 TP 浓度变化趋势与 TN 浓度较为相似,3 个湖区长期变化趋势均呈现显著或极显著上升(表 1)。其中 1986—2002 年呈先下降后上升的趋势,2003—2007 年总体呈现小幅降低趋势,但 2008 年以来又开始回升(图 3b)。在空间上,3 个湖区 TP 浓度空间差异性较小,东洞庭湖略高于其他湖区。

参与洞庭湖 TLI 计算的其它 3 项指标中, COD_{Mn} 和 Chl.a 浓度 30 年来无显著变化趋势(表 1), COD_{Mn} 在 1.73~4.76 mg/L 范围内波动变化,单项因子评价属 II~III 类水质, Chl.a 浓度在 0.53~5.93 mg/m³ 范围内波动变化;而 SD 均呈现上升趋势,其中东洞庭湖与西洞庭湖区呈现极显著上升趋势,但 30 年间变化范围较小,在 0.18~0.68 m 之间变化。在空间分布差异上,各个湖区 COD_{Mn} 无显著性差异,但东洞庭湖 Chl.a 和 SD 均显

著高于其它湖区($P<0.05$).

2.3 洞庭湖营养状态演变特征

洞庭湖 *TLI* 在长期监测中呈现波动性上升趋势(图 3c), 除 2008—2010 年与 2015 年东洞庭湖等部分湖区 *TLI* 大于 50.0, 为轻度富营养化外, 3 个湖区在 30 年的监测中总体呈现中营养水平, 各湖区变化趋势定量统计分析结果表明(表 1), 3 个湖区均呈现上升趋势, 其中东洞庭湖与西洞庭湖上升趋势极显著. M-K 突变检验结果(图 4)表明, 东洞庭湖与西洞庭湖大致在 1996 年出现第 1 次拐点, 水质富营养化明显加剧; 全湖 3 个湖区在 2003 年出现第 2 次拐点, 水质富营养化均有所减缓; 各湖区在 2007 年出现第 3 次拐点, 各湖区富营养化由减缓又变为加剧; 在空间分布上各湖区 *TLI* 总体表现为东洞庭湖>西洞庭湖>南洞庭湖, 且东洞庭湖与其它湖区差异性极显著, 西洞庭湖与南洞庭湖差异不大.

表 1 洞庭湖各湖区 TN、TP、COD_{Mn}、Chl.a 和 *TLI* 演变特征统计分析*

Tab.1 The analyse of variety tendency of TN, TP, COD_{Mn}, Chl.a and *TLI* in each area of Lake Dongting

项目	湖区	r_s 值	$W_p(P<0.05)$	$W_p(P<0.01)$	评价结果
TN	西	0.592	0.306	0.432	极显著上升
	南	0.817	0.306	0.432	极显著上升
	东	0.85	0.306	0.432	极显著上升
TP	西	0.382	0.306	0.432	显著上升
	南	0.451	0.306	0.432	极显著上升
	东	0.388	0.306	0.432	显著上升
COD _{Mn}	西	-0.250	0.306	0.432	下降(不显著)
	南	-0.132	0.306	0.432	下降(不显著)
	东	0.151	0.306	0.432	上升(不显著)
叶绿素 a	西	0.101	0.306	0.432	上升(不显著)
	南	0.098	0.306	0.432	上升(不显著)
	东	0.029	0.306	0.432	上升(不显著)
SD	西	0.593	0.306	0.432	极显著上升
	南	0.277	0.306	0.432	上升(不显著)
	东	0.546	0.306	0.432	极显著上升
<i>TLI</i>	西	0.201	0.306	0.432	上升(不显著)
	南	0.612	0.306	0.432	极显著上升
	东	0.354	0.306	0.432	显著上升

* $r_s>0$ 表明呈上升趋势, $r_s>W_p$ 表明达到显著或极显著水平.

2.4 洞庭湖浮游藻类演变特征

2008—2015 年, 洞庭湖浮游植物共检出 8 门 66 属, 其中蓝藻门 9 属, 绿藻门 22 属, 硅藻门 23 属, 裸藻门 4 属, 甲藻门 4 属, 隐藻门 2 属, 黄藻门 1 属, 金藻门 1 属. 全湖浮游藻类年均密度为 54.2×10^4 cells/L, 其中优势种为小环藻(*Cyclotella* sp.), 与 1986—2007 年数据相比(表 2), 洞庭湖藻类密度近年来显著上升($P<0.01$), 主要优势藻类演替由舟形藻(*Navicula* sp.) 转变为小环藻, 但均为硅藻. 近年来硅藻占比有所下降, 而蓝藻数量开始迅速上升(年均占比 20.2%), 极显著高于 1986—2007 年监测数据($P<0.01$), 主要因为近年来大、小西湖保护区等东洞庭湖区断面, 属湖湾水域, 蓝藻数量开始增多, 其中 2012 年 9 月达最高值, 达 106×10^4 cells/L. 况琪军等^[12] 总结国内外相关研究资料时把舟形藻与小环藻等硅藻划分为中-富营养型水生态环境的代表种, 把鱼腥藻等蓝藻划分为富营养型水生态环境的代表种. 表明 30 年来洞庭湖水生态环境类型总体为中-富营养型, 但呈现向富营养化型转变趋势.

3 讨论

3.1 洞庭湖水质营养状况演变成因及趋势分析

根据各湖区 *TLI* 指数的 M-K 突变检验结果(图 4), 将洞庭湖 1985—2002 年(由 1986—1995 年与 1996—

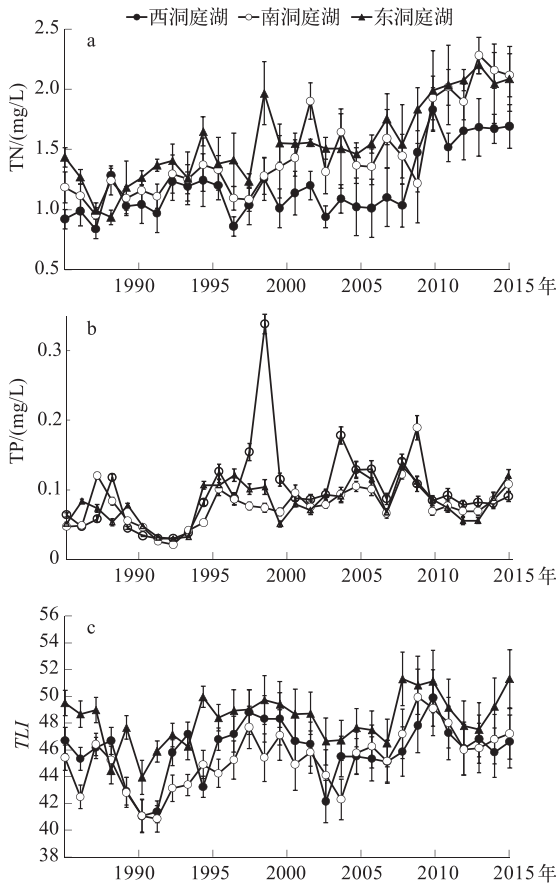


图 3 1986—2015 年洞庭湖各湖区 TN(a)、TP(b) 和 TLI(c) 演变特征

Fig.3 The evolution of TN (a), TP (b) and TLI (c) in each areas of Lake Dongting during 1986—2015

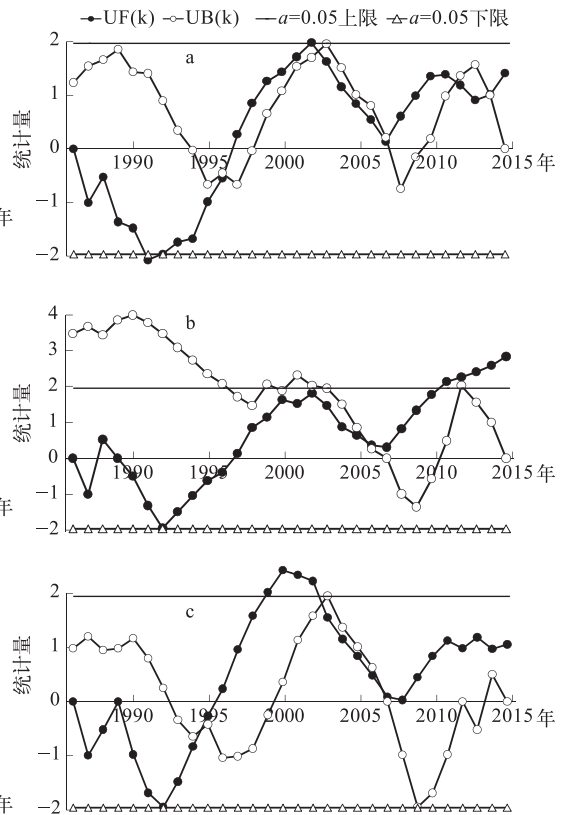


图 4 1986—2015 年东洞庭湖(a)、南洞庭湖(b)和西洞庭湖(c) TLI 指数 M-K 突变检验曲线

Fig.4 M-K statistics graph of the TLI index in east (a), south (b) and west (c) of Lake Dongting during 1986—2015

表 2 洞庭湖浮游藻类概况

Tab.2 The status of microphyte of Lake Dongting

时间	年均密度/(cells/L)	优势属	门	硅藻占比/%	蓝藻占比/%
1986—2002 年	10.2×10^4	舟形藻	硅藻	52.1	4.93
2003—2007 年	8.93×10^4	舟形藻	硅藻	59.1	4.12
2008—2015 年	54.2×10^4	小环藻	硅藻	30.8	21.6

2002 年合并为一个阶段)分为第一阶段,这一时期洞庭湖多次暴发洪水^[13],1988、1996、1998 和 1999 年 4 次较大规模洪水时期相应水体 TP、TN 与 TLI 明显升高(图 3),国内外相关文献表明^[14-15],洪水期间地表径流携带的大量悬浮物会使湖泊水体中氮、磷等污染物浓度升高. 申锐莉等^[9]研究也认为洪水明显推进洞庭湖水体富营养化,考虑到生活污染源与工业污染源季节性变化较小,只有农业等面源污染源和暴雨径流随流量和雨季的变化大^[16],说明这一时期洞庭湖流域面源污染较严重,主要是水土流失、水产养殖、农药化肥、畜禽粪便等污染造成的^[9]. 这与同在长江中下游的浅水湖泊鄱阳湖的水体富营养化规律颇为相似^[17]. 1986—2002 年间洞庭湖来沙量巨大,“三口”年均来沙 $6959 \times 10^4 \sim 10021 \times 10^4 \text{ t}$,“四水”来沙 $1584 \times 10^4 \sim 2814 \times 10^4 \text{ t}$,

明显高于 2003 年以后年均值^[18], 而泥沙作为水体氮、磷等污染物迁移转化的重要载体, 吸附和释放污染物, 同时通过泥沙运动, 影响着水体环境质量^[19], 因此这一时期内泥沙可能吸附大量污染物进入洞庭湖后释放进入水体, 湖泊污染负荷进一步加重. 但洞庭湖来沙量巨大的同时, 来水量也相应较大, 这一时期“三口”年均来水 $687 \times 10^8 \sim 834 \times 10^8 \text{ m}^3$, “四水”来水 $1699 \times 10^8 \sim 1724 \times 10^8 \text{ m}^3$, 也明显高于 2003 年以后年均值^[18], 来水量大有利于洞庭湖水环境容量增加, 相应降低 TN、TP 等主要污染物浓度, 因此除 1986—1988 和 1998—2002 年等暴发较大规模洪水时期非常接近富营养水平外(其中 1999 年东洞庭湖 TLI 值为 49.7), 1989—1997 年全湖水体营养状况总体维持在中营养水平, TLI 均值在 45.0 左右. 空间分布上, 南洞庭湖在此期间受影响最小, 可能因为洞庭湖来沙主要通过西洞庭湖的“三口”进入^[18], 而且西洞庭湖区的开垦程度较大, 有最大的开垦田青山垸^[20], 而东洞庭湖区受城镇人口生活生产活动影响相对最为严重^[5]. 所以南洞庭湖在洪水期间受来沙、地表径流带入氮、磷等污染物以及工业污水和生活污水等方面影响程度分别低于西洞庭湖和东洞庭湖, 因而水体营养状况在期间变化趋势不如后两者明显.

2003—2007 年为第二阶段, 这一时期内洞庭湖各湖区均在 2003 年左右出现突变拐点, 这一时期内主要特征是水体富营养化趋势有所减缓, TN 和 TP 等主要污染物稳定在相对低位水平, 其中 TLI 值在 42.1~48.4 间(图 3c)波动下行, TN 和 TP 浓度分别维持在 0.872~1.92 和 0.082~0.132 mg/L 的相对较低浓度水平(图 3a, b), 这一结论与秦迪岚等^[21]的研究结果相符. 郭建平等^[22]认为, 自 2003 年开始洞庭湖受城市工业性污染比重开始下降, 而农业面源污染比重开始明显上升. 进入新世纪以来洞庭湖再未发生较大规模洪水, 面源污染影响程度与影响范围可能较为有限, 不能抵消工业污染的下降效应. 再加上 1998 年以来的退田还湖工程、三峡工程和生态移民对洞庭湖整体水域起了扩大湖泊面积和水环境容量作用^[9, 22], 从而增加了水体的自净能力. 2003—2007 年间, “三口”、“四水”年均来沙量相比三峡工程运行前明显减少, 分别为 1396×10^4 、 $991 \times 10^4 \text{ t}$, 但来水量却没有明显减少, 分别为 682×10^8 、 $1545 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[23], 因此期间湖泊环境容量相对扩大的同时泥沙携带进入洞庭湖的污染物却明显减少, 对洞庭湖水体富营养化的减缓影响不可忽视. 在空间分布上, 南洞庭湖 TLI 值和主要污染物浓度虽然仍处于最低值, 但其改善效果最不明显.

2008—2015 年为第三阶段, 各湖区均在 2007 年前左右出现突变拐点后富营养化加剧, 各主要污染物浓度显著上升的趋势, TLI、TN、TP 均呈现波动上升. 黄代中等^[5]认为这一时期内水质变化趋势可能是流域社会经济持续快速发展造成的工业污染、农业面源污染及湖内沉积物释放所造成的. 这一时期三峡工程的运行和严重干旱等因素也导致了入湖水量减少并使水体交换不畅, 削弱了湖泊水体净化能力^[18, 24]. 2008—2014 年洞庭湖年均来沙量与 2003—2007 年相比没有明显减少, “三口”、“四水”分别为 1152×10^4 、 $873 \times 10^4 \text{ t}$, 但来水量却明显减少, 尤其是“三口”来水仅为 $306 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[18, 23](统计数据中 2013 年和 2014 年数据来自湖南水利厅水资源公报), 直接造成湖区水环境容量减小而污染物浓度相应上升, 从而使水体富营养化. 秦迪岚等^[21]2008 年对洞庭湖污染来源调查结果表明, 洞庭湖的特征污染物为 TN 和 TP, 磷污染主要来源于洞庭湖区、沅江和湘江, 而氮污染主要来源于湘江, 洞庭湖区氮磷污染主要来源于农业面源污染和城镇生活污染. 2008 年以来, 除 2013 和 2014 年外, 东洞庭湖 TN 浓度均处于全湖最高水平(图 3a); 而西洞庭湖 TP 浓度除 2015 年外均处于全湖最高水平(图 3b), 这一结果印证了秦迪岚等^[21]的调查结论. 而这一时期内东洞庭湖富营养化程度仍处于全湖最高水平. 这可能是该湖区人类活动比另外 2 个湖区频繁, 生产生活活动导致大量污染物进入周边^[5].

1986—2015 年, 全湖 I~III 类水质呈现极显著下降趋势, 由 1986—1990 年以 I~III 类水质为主演变为近五年以来以 IV 类水质为主, 而 30 年长期变化趋势中只有 TN、TP 和 TLI 一起呈现显著或极显著上升趋势, 这表明与许多富营养化湖泊类似^[24], TP、TN 是水质主要影响因子, 是洞庭湖水体中主要污染物, 也是水体营养状况是否向富营养化转变的主要影响因子. 在大尺度时间分布上全湖从 1986—2015 年 TP、TN 浓度以及水体 TLI 均呈现显著或极显著上升趋势, 由此推测洞庭湖未来一段时间内仍将继续处于向富营养化湖泊转变进程中.

3.2 与长江中下游其它浅水湖泊比较分析

洞庭湖水体中的 N、P 浓度实际已具备水体发生富营养化的条件, 与鄱阳湖一样面临水体富营养化甚至暴发藻类水华的严峻形势^[25]. 国际上一般认为, 在静止水体中, TP 浓度达到 0.086 mg/L 即为富营养化的临

界值^[26],秦伯强^[1]在总结暴发蓝藻水华的富营养化湖泊研究资料发现,水体中营养盐浓度范围大致接近,即 TN 浓度在 1~10 mg/L 之间,TP 浓度在 0.01~0.1 mg/L 之间;陈宇炜^[27]总结太湖蓝藻水华暴发条件认为:蓝藻水华的适应条件是水温 20℃ 以上,水体 TP 浓度在 100~800 μg/L 之间,TN 在浓度 2.5~3.5 mg/L 之间,以及适度浑浊的透明度条件将有利于微囊藻与其他藻类竞争.张民等^[28]对巢湖研究结果表明,2013 年巢湖仍然暴发大面积蓝藻水华,其 TN 浓度约为 2.5 mg/L,TP 浓度约为 0.15 mg/L.洞庭湖尤其是东洞庭湖区近五年来 TP 浓度最高达 0.132 mg/L(均值为 0.119 mg/L),TN 浓度最高达 2.37 mg/L(均值为 2.12 mg/L),洞庭湖与太湖、巢湖同为长江中下游浅水湖泊,水温、气候等条件相近,SD 在 0.18~0.68 m 之间,也与太湖水体 2005—2006 年透明度(0.31~0.70 m)在同一水平^[3],但很少有洞庭湖暴发蓝藻水华的文献报导.原因可能是洞庭湖为通江湖泊,换水周期快,约 18 d 左右^[5],明显快于太湖的 264 d 与巢湖的 127 d,蓝藻无法在流动的水体中生长聚集^[29].刘霞等^[29]研究认为,鄱阳湖与洞庭湖主体湖泊水体未暴发蓝藻水华,关键原因在于湖泊有一定水流速度;但鄱阳湖东部湖湾主要污染物 TN 和 TP 浓度分别达到 0.57~3.14 mg/L(均值为 1.53 mg/L)和 0.02~0.29 mg/L(均值为 0.05 mg/L),水流较缓,水力停留时间较长,已成为蓝藻的原位生长区域,其水质条件与水动力条件符合蓝藻的生长聚集.钱奎梅等^[30]研究也表明,鄱阳湖部分湖湾区自 2007 年已经发现了明显水华蓝藻聚集现象,且 2013—2014 年水华分布区域范围增加,蓝藻生物量占浮游生物总生物量的比例有逐年增加的趋势.洞庭湖藻类监测数据表明(表 2),1986—2002 年,洞庭湖浮游藻类(年均密度为 10.2×10^4 cells/L)以硅藻为主,占总数的 52.1%,蓝藻占比为 4.93%;2003—2007 年年均密度为 8.93×10^4 cells/L,仍以硅藻为优势类群,占总数的 59.1%,蓝藻占比为 4.12%,而 2008—2015 年,年均密度达 54.2×10^4 cells/L,硅藻虽为主要优势种,但占比已明显下降至 30.8%,而蓝藻占比已经迅速上升至 21.6%,为次级优势种,与鄱阳湖相似^[30],王琦等^[18]研究结果甚至发现 2013 年 9 月东洞庭湖湖面有 400 km²的微囊藻水华.与鄱阳湖一样,洞庭湖尤其是东洞庭湖水流较缓的湖湾区面临蓝藻生长聚集甚至暴发水华的严峻形势.

但与鄱阳湖也有所不同,洞庭湖吞吐长江,三峡工程蓄水前“三口”来水来沙量巨大,一度造成洞庭湖泥沙严重淤积^[13],其中 1996—2002 年来水量占比 23.4%,来沙量占比 79.5%^[18].而鄱阳湖入湖泥沙负荷主要来自赣江等五大入湖河流^[31].随着三峡工程的运行,长江“三口”来水来沙量明显减小,洞庭湖水位降低,换水周期变长,湖泊水体交换不畅,一方面将削弱湖泊水体对污染物的净化能力^[24],另一方面,水体透明度增大,藻类光合作用增强,利于藻类生长繁殖^[5],而在水流相对静止的天然湖泊水体环境中,蓝藻比硅藻和绿藻更有竞争优势^[32].因此洞庭湖面临形势可能更为严峻.

4 参考文献

- [1] Qin Boqiang. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2002, **14**(3): 193-202(in Chinese with English abstract).DOI: 10.18307/2002.0301. [秦伯强.长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探.湖泊科学,2002,14(3):193-202.]
- [2] Yin Fucai, Zhang Zhiyuan. Survey of Chaohu Lake eutrophication research. *J Lake Sci*, 2003, **15**(4): 377-384(in Chinese with English abstract).DOI: 10.18307/2003.0413.[殷福才,张之源.巢湖富营养化研究进展.湖泊科学,2003,15(4):377-384.]
- [3] Zhu Guangwei. Eutrophic status and causing factors for a large, shallow and subtropical Lake Taihu, China. *J Lake Sci*, 2008, **20**(1): 21-26(in Chinese with English abstract).DOI: 10.18307/2008.0103.[朱广伟.太湖富营养化现状及原因分析.湖泊科学,2008,20(1):21-26.]
- [4] Liu Liping. Characteristics of blue algal bloom in dianchi lake and analysis on its cause. *Research of Environmental Sciences*, 1999, **12**(5): 36-37(in Chinese with English abstract).[刘丽萍.滇池水华特征及成因分析.环境科学研究,1999,12(5):36-37.]
- [5] Huang Daizhong, Wan Qun, Li Liqiang *et al.* Changes of water quality and entrophic state in recent 20 years of Lake Dongting. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(1): 27-33(in Chinese with English abstract).[黄代中,万群,李利强等.洞庭湖近 20 年水质与富营养化状态变化.环境科学研究,2013,26(1):27-33.]
- [6] Wang Xu, Xiao Weihua, Zhu Weiyao *et al.* Effects of water level variation on water quality in Lake Dongting. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2012, **10**(5): 59-62(in Chinese with English abstract).DOI: 10.

- 3724/SP.J.1201.2012.05059.[王旭, 肖伟华, 朱维耀等. 洞庭湖水位变化对水质影响分析. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 59-62.]
- [7] Dai Shibao, Yang Shilun, Zhu Jun *et al.* The role of Lake Dongting in regulating the sediment budget of the Yangtze River. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005, 9(6): 692-698.
- [8] Yao Zhigang. Comparison between BCR sequential extraction and geo-accumulation method to evaluate metal mobility in sediments of Lake Dongting, Central China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2003, 26(1): 14-22. DOI: 10.1007/s00343-008-0014-7.
- [9] Shen Ruili, Bao Zhengyu, Zhou Min *et al.* Temporal-spatial evolution of water quality in Lake Dongting, China. *J Lake Sci*, 2007, 19(6): 677-682(in Chinese with English abstract).DOI: 10.18307/2007.0609.[申锐莉, 鲍征宇, 周旻等. 洞庭湖湖区水质时空演化(1986—2004年). 湖泊科学, 2007, 19(6): 677-682.]
- [10] Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China ed. *Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods*; 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 200-284(in Chinese).[国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 200-284.]
- [11] Jin Xiangcan ed. *Lakes in China*. Beijing: Ocean Press, 1995(in Chinese).[金相灿. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995.]
- [12] Kuang Qijun, Ma Peiming, Hu Zhengyu *et al.* Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(2): 87-91(in Chinese with English abstract).[况琪军, 马沛明, 胡征宇等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 87-91.]
- [13] Li Jingbao, Zhu Xiang, Zhou Guohua *et al.* The compound effect of disastrous floods in Lake Dongting on concurrence of ecological disasters. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 334-340(in Chinese with English abstract).[李景保, 朱翔, 周国华等. 洞庭湖区灾害性洪水对生态灾害群发的复合效应. 生态学报, 2002, 22(3): 334-340.]
- [14] Qin Boqiang, Yang Liuyan, Chen Feizhou *et al.* Mechanism and control technology of lake eutrophication and its application. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16): 1857-1866(in Chinese).[秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用. 科学通报, 2006, 51(16): 1857-1866.]
- [15] Havens KE, Jin KR, Rodusky AJ *et al.* Hurricane effects on a shallow lake ecosystem and its response to a controlled manipulation of water level. *The Science World*, 2001, (1): 44-70. DOI: 10.1100/tsw.2001.14.
- [16] Cao Chengjin, Qin Yanwen, Zheng Binghui *et al.* Analysis of phosphorus distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2009, 29(2): 310-315(in Chinese with English abstract).[曹承进, 秦延文, 郑丙辉等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析. 环境科学, 2009, 29(2): 310-315.]
- [17] Wang Shengrui, Shu Jianmin, Ni Zhaokui *et al.* Investigation on pollution situation and countermeasures in Poyang Lake. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2013, 3(4): 342-348(in Chinese with English abstract).[王圣瑞, 舒俭民, 倪兆奎等. 鄱阳湖水污染现状调查及防治对策. 环境工程技术学报, 2013, 3(4): 342-348.]
- [18] Wang Qi, Ou Fuping, Zhang Lei *et al.* Changes of water environment in Lake Dongting and its impact analysis after the Three Gorges Project operation. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(11): 1843-1849(in Chinese with English abstract).DOI: 10.11870/cjlyzyhj201511006.[王琦, 欧伏平, 张雷等. 三峡工程运行后洞庭湖水环境变化及影响分析. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 1843-1849.]
- [19] Yu Xuezhong, Zhong Deyu, Li Jinxiu *et al.* Review of studies on sediment in water environment. *Journal of Sediment Research*, 2004, (6): 75-80(in Chinese).[禹雪中, 钟德钰, 李锦秀等. 水环境中泥沙作用研究进展及分析. 泥沙研究, 2004, (6): 75-80.]
- [20] Jiang Jiahu, Zhang Shen, Huang Qun *et al.* Analysis on the restoration and ecological recovery of Lake Dongting by stopping cultivation. *J Lake Sci*, 2004, 16(4): 325-330(in Chinese with English abstract).DOI: 10.18307/2004.0406.[姜加虎, 张琛, 黄群等. 洞庭湖退田还湖及其生态恢复过程分析. 湖泊科学, 2004, 16(4): 325-330.]
- [21] Qin Dilan, Luo Yueping, Huang Zhe *et al.* Pollution status and source analysis of water environment in Lake Dongting. *Environment Science & Technology*, 2012, 35(8): 193-198(in Chinese with English abstract).[秦迪岚, 罗岳平, 黄哲等. 洞庭湖水环境污染状况与来源分析. 环境科学与技术, 2012, 35(8): 193-198.]
- [22] Guo Jianping, Wu Fucheng, Xiong Jian'an. Study on the water pollution and the preventing and controlling measures of Lake Dongting. *Journal of Hunnan University of Arts and Science*, 2007, 32(1): 91-94(in Chinese).[郭建平, 吴甫成,

- 熊建安. 洞庭湖水体污染及防治对策研究. 湖南文理学院学报, 2007, **32**(1): 91-94.]
- [23] Li Yuelong ed. Lake Dongting Journal. Changsha: Hunan People's Publishing House, 2013: 222-267 (in Chinese). [李跃龙. 洞庭湖志. 长沙: 湖南人民出版社, 2013: 222-267.]
- [24] Sun Zhandong, Hang Qun, Jiang Jiahu. Changes of major ecological and environmental issues in Lake Dongting region. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(9): 1108-1113 (in Chinese with English abstract). [孙占东, 黄群, 姜加虎. 洞庭湖主要生态环境问题变化分析. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(9): 1108-1113.]
- [25] Wang Maolan, Zhou Wenbin, Hu Chunhua. Status of nitrogen and phosphorus in waters of Lake Poyang Basin. *J Lake Sci*, 2008, **20**(3): 334-338 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2008.0311. [王毛兰, 周文斌, 胡春华. 鄱阳湖区水体氮、磷污染状况分析. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 334-338.]
- [26] UK Environmental Agency. Environmental ISSUES series-aquatic eutrophication in England and Wales. UK Environmental Agency Consultative Report, December 1998.
- [27] Chen Yuwei, Qin Boqiang, Teubner K *et al.* Long-term dynamics of phytoplankton assemblages; *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**(1): 445-453.
- [28] Zhang Min, Kong Fanxiang. The process, spatial and temporal distributions and strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984 - 2013). *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 791-798 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2015.0505. [张民, 孔繁翔. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略 (1984 - 2013 年). 湖泊科学, 2015, **27**(5): 791-798.]
- [29] Liu Xia, Li YunLiang, Liu Baogui *et al.* Cyanobacteria in the complex river-connected Poyang Lake: horizontal distribution and transport. *Hydrobiology*, 2016, **768**: 95-110. DOI: 10.1007/s10750-015-2536-2.
- [30] Qian Kuimei, Liu Xia, Duan Ming *et al.* Distribution and its influencing factors of bloom-forming cyanobacteria in Poyang Lake. *China Environment Science*, 2016, **36**(1): 261-267 (in Chinese with English abstract). [钱梅奎, 刘霞, 段明等. 鄱阳湖蓝藻分布及其影响因素分析. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 261-267.]
- [31] Yu Jinxiang, Zheng Bofu, Liu Yafei *et al.* Evaluation of soil loss and transportation load of adsorption N and P in Poyang Lake watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(14): 3980-3989 (in Chinese with English abstract). [余进祥, 郑博福, 刘娅菲等. 鄱阳湖流域泥沙流失及吸附态氮磷输出负荷评估. 生态学报, 2011, **31**(14): 3980-3989.]
- [32] Wu Xiaohui, Li Qijun. Reviews of influences from hydrodynamic conditions on algae. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(7): 1732-1738 (in Chinese with English abstract). [吴晓辉, 李其军. 水动力条件对藻类影响的研究进展. 生态环境学报, 2010, **19**(7): 1732-1738.]